

Física Moderna

Eduardo Kojoy Takahashi

**Faculdade de Física
Universidade Federal de Uberlândia**

Núcleo de Pesquisa em Tecnologias Cognitivas - NUTEC

Ementa da disciplina

- **Conhecimento Científico no Final do Século XIX**
- **Novas Descobertas Experimentais**
- **Os Problemas da Física no Início do Século XX**
- **A Quantização da Energia**
- **A Dualidade Onda-Partícula**
- **Modelos Atômicos**
- **Equação de Schrödinger**
- **Sistemas Quânticos de Muitas Partículas**
- **O Estado da Arte**

Pequena Bibliografia Básica

Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas

R. EISBERG e R. RESNICK

Ed. Campus

Uma História da Física e da Química

J. ROSMORDUC

Jorge Zahar Editó

Curso de Física Moderna

V. ACOSTA, C. L. COWAN E B. J. GRAHAM

Ed. Harla

Física – Volume 3

P. A. TIPLER

Ed. LTC

Pequena Bibliografia Básica

Fundamentos de Física – Volume 4

D. HALLIDAY, R. RESNICK e J. WALKER

Ed. Campus

Física Quântica

S. GAZEOROWICZ

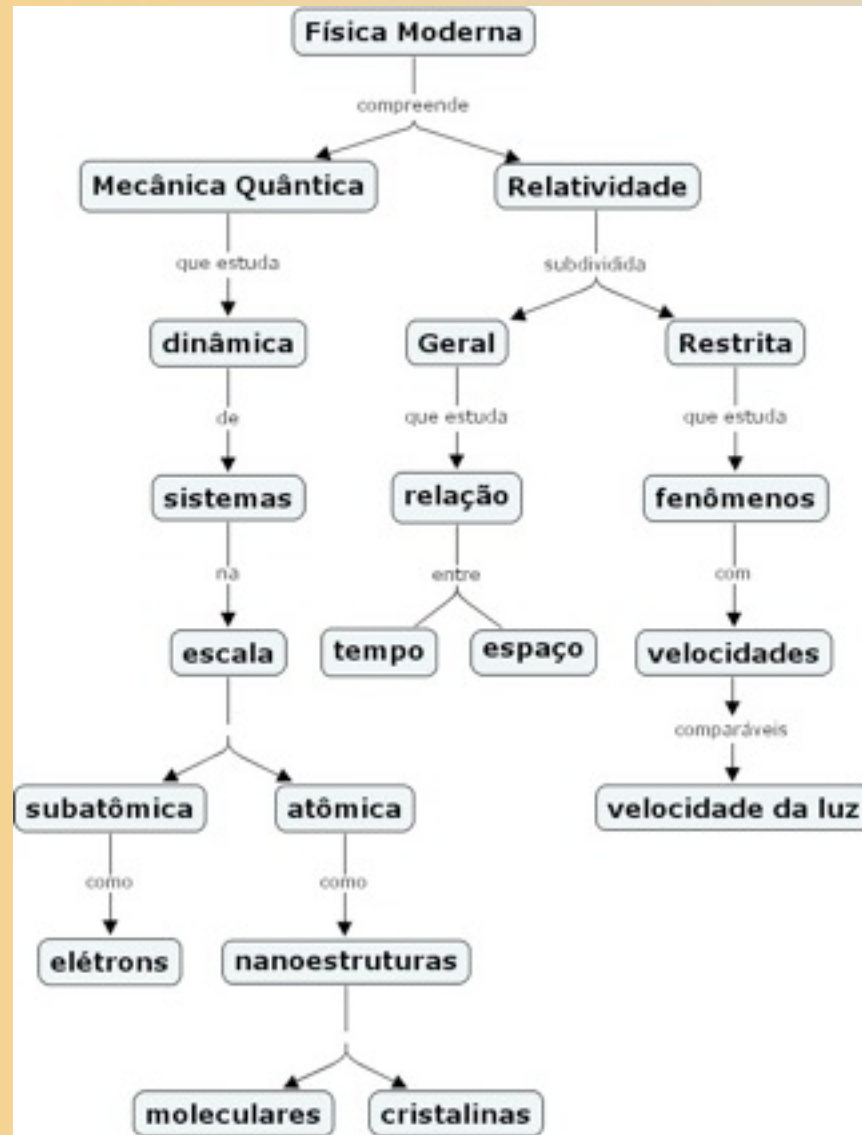
Ed. Guanabara Dois

Créditos Parciais

Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins
UNICAMP

**A física no final do século XIX:
modelos em crise**

Física Moderna



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Mecânica Clássica

- Galileu Galilei (italiano: 1564 – 1642)

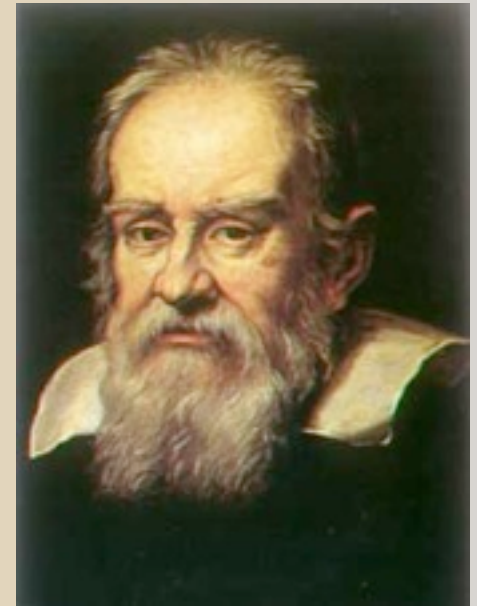
Le operazioni del compasso geometrico militare (1606)

Inventa o termoscópio (um termômetro primitivo)

Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo (1632)

Trattato di mechaniche (pub. 1634)

Discurso das Duas Novas Ciências, Mecânica e Dinâmica (1638)



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Mecânica Clássica

- Rene Descartes (francês: 1596 - 1650)

Conservação da quantidade de movimento (1629)



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Mecânica Clássica

- Isaac Newton (inglês: 1643 - 1727)

Principia mathematica philosophiae naturalis (1687)



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Eletricidade e Magnetismo

-William Gilbert (inglês: 1544 - 1603)

De Magnete (1600)

Primeiros experimentos da História da Física, sustentados e reconfirmados.

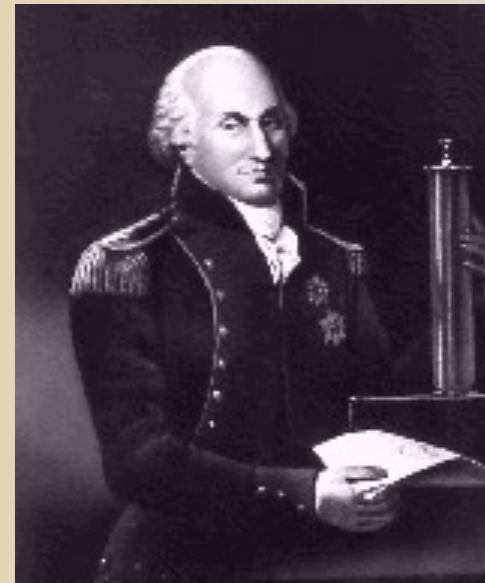


Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Eletricidade e Magnetismo

- Charles Augustin de Coulomb (francês: 1736 – 1806)

Trabalhos de Coulomb sobre a Eletrostática (1785)

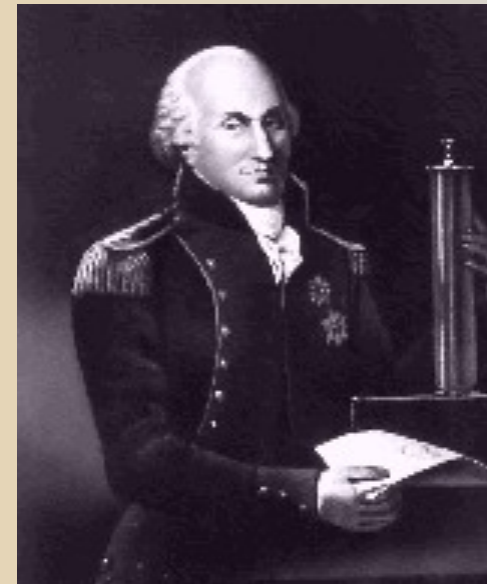


Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Eletricidade e Magnetismo

- **Stephen Gray (inglês: 1696 – 1736)**

**Trabalhos sobre a eletrostática: condutores, isolantes,
Cargas distribuídas sobre a superfície
Dos condutores (1729)**



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Eletricidade e Magnetismo

- Hans Oersted (dinamarquês: 1777 – 1851)

Corrente elétrica criando campo magnético (1820)

Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Termodinâmica

-Robert Boyle (inglês: 1627 - 1691)

The Sceptical Chymist (1661)

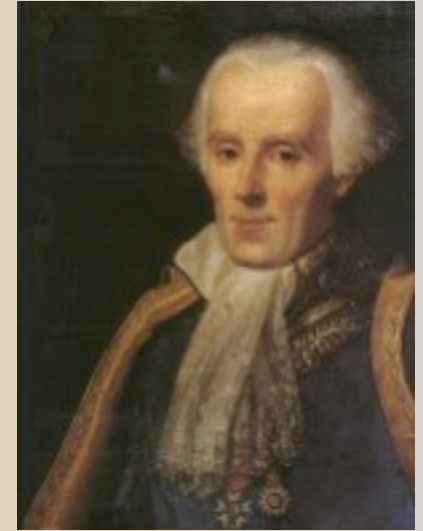
Estudos sobre a dilatação dos gases (1662)



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Termodinâmica

- Pierre Laplace (francês: 1749 – 1827)



e Antoine Lavoisier (francês: 1743 - 1794)



Estudos sobre o calor (1780)

Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Termodinâmica

- Ludwig Boltzmann (austríaco: 1844 - 1906)

Termodinâmica

- ★ teoria cinética dos gases:
temperatura = energia
cinética das moléculas
- ★ mecânica estatística: leis
probabilísticas



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Óptica

-Willebrord van Roijen Snell (1591-1626)

Leis da refração (1621)



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Óptica

-Christiaan Huygens (inglês: 1629-1695)

Tratado da Luz (1690)

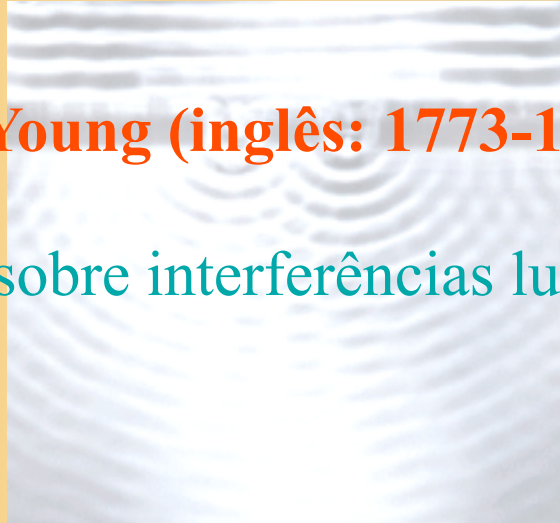


Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Óptica

-Thomas Young (inglês: 1773-1829)

Trabalhos sobre interferências luminosas (1802)



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Óptica

- **Joseph von Fraunhofer (alemão: 1787-1826)**

Espectrografia da luz do sol e das estrelas (1814)



Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Óptica

- Augustin Fresnel (francês: 1788-1827)

Estudos sobre a difração (1816)

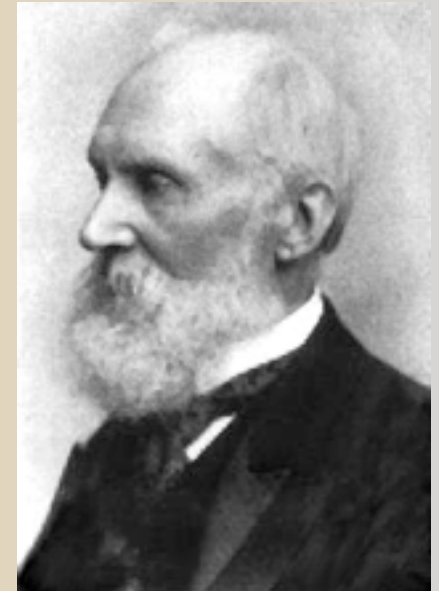


Conhecimento Científico no Final do Século XIX

Em 1900 alguns físicos pensavam que a física estava praticamente completa.

Lord Kelvin recomendou que os jovens não se dedicassem à física, pois só faltavam alguns detalhes pouco interessantes, como o refinamento de medidas.

Lord Kelvin, no entanto, mencionou que havia “duas pequenas nuvens” no horizonte da física: os resultados negativos do experimento de Michelson e Morley, e a dificuldade em explicar a distribuição de energia na radiação de um corpo negro.



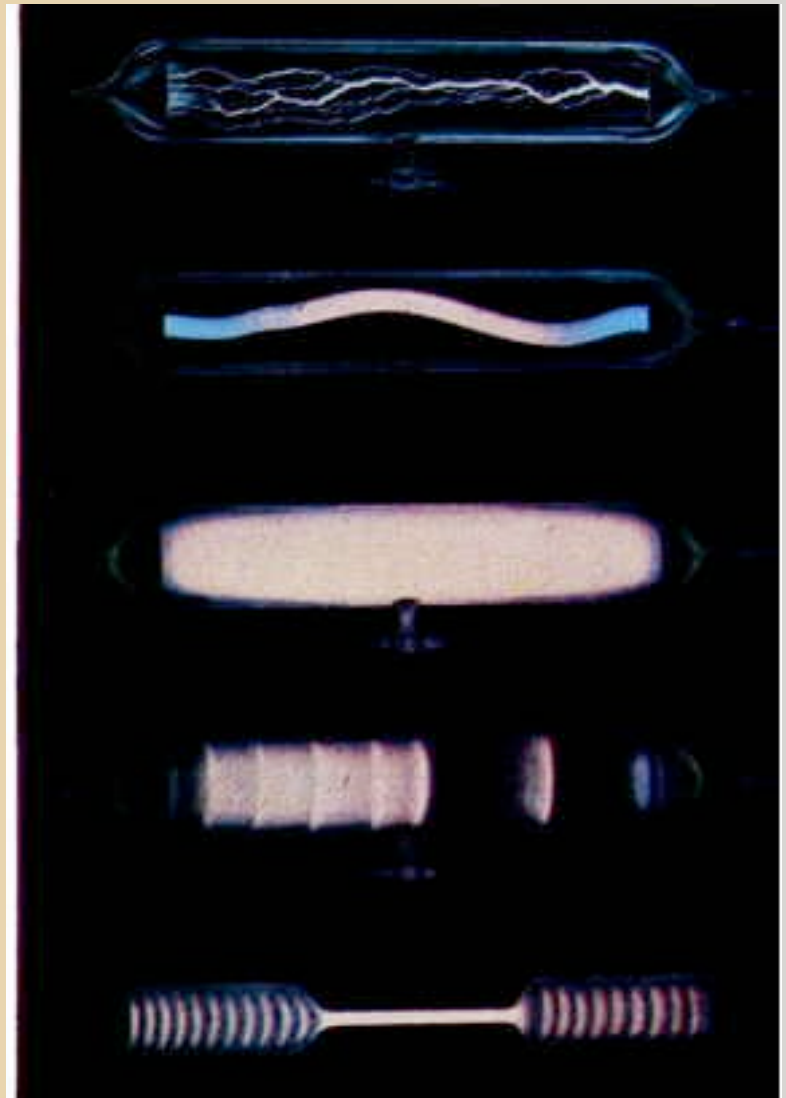
Novas Descobertas Experimentais

Mas existiam outros problemas na Física !

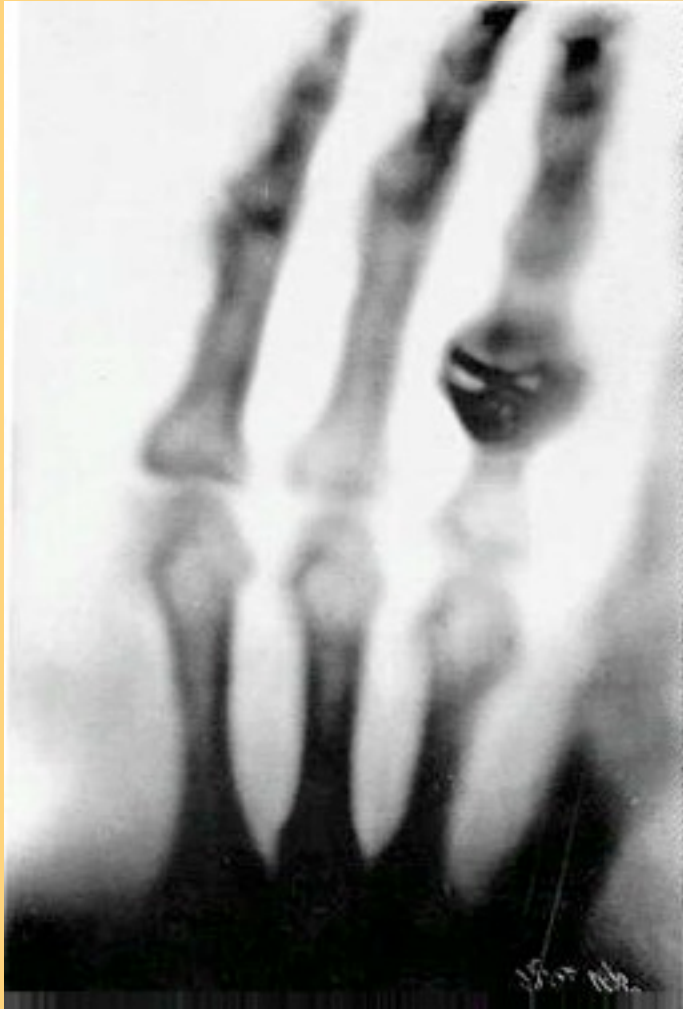
- **Novos fenômenos inexplicados**
- **Problemas teóricos e conceituais.**

Novas Descobertas Experimentais

O estudo de descargas elétricas em gases rarefeitos levou à descoberta dos raios catódicos



Novas Descobertas Experimentais

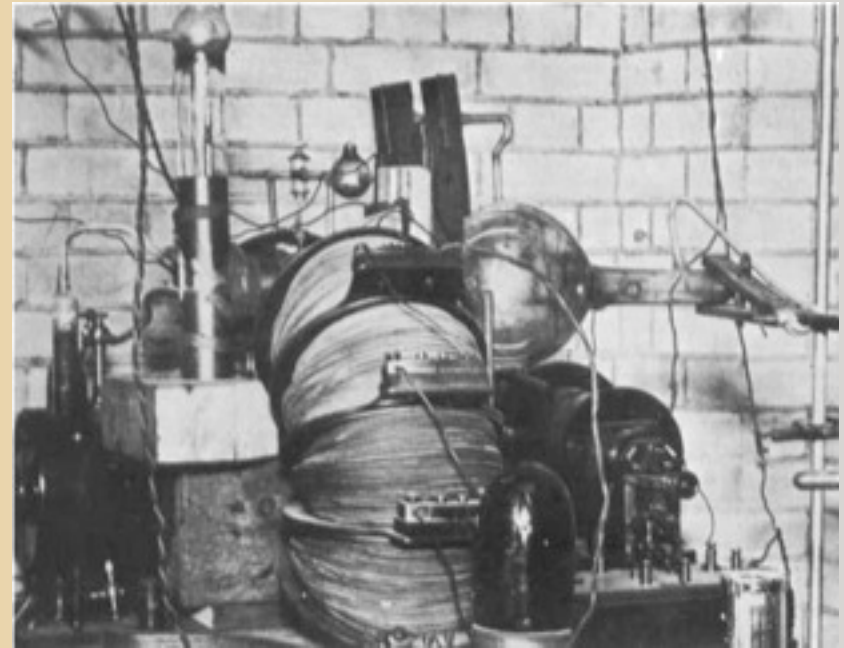
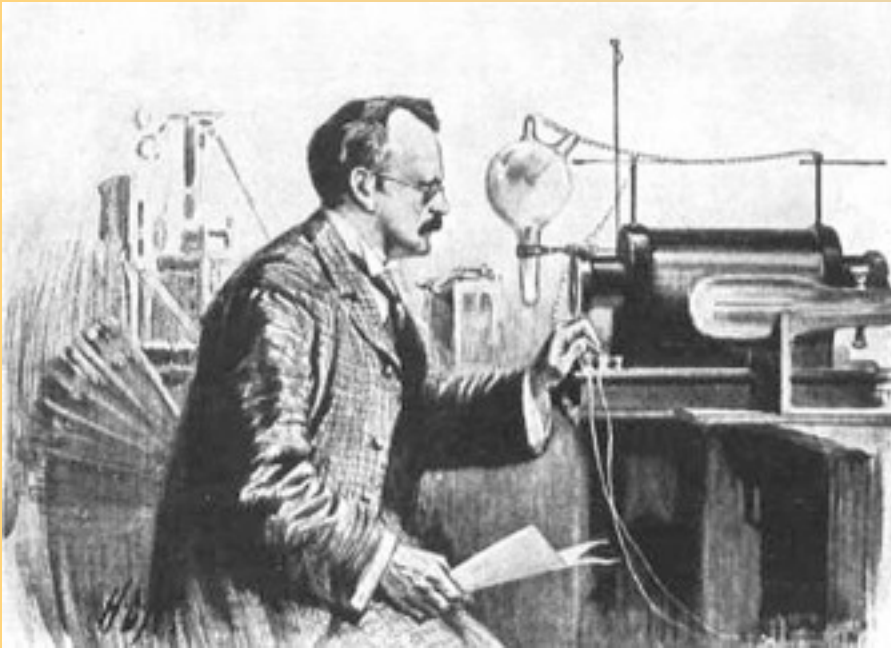


Os raios catódicos levaram à descoberta dos raios X, que eram úteis mas misteriosos.



Novas Descobertas Experimentais

J. J. Thomson, estudando os raios catódicos, descobriu o elétron. Mas que relação os elétrons tinham com os átomos da matéria?



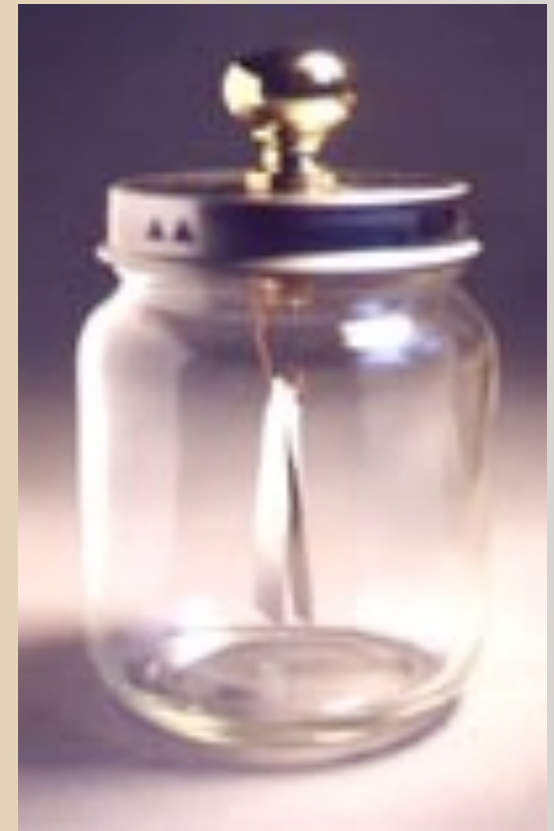
Novas Descobertas Experimentais

Os estudos de Henri Becquerel e do casal Curie levaram à descoberta da radioatividade e de estranhos elementos que emitiam energia de origem desconhecida.



Novas Descobertas Experimentais

Os raios X e a luz ultravioleta podiam descarregar eletroscópios, e em alguns casos a luz visível também, mas o fenômeno não era compreendido: por que alguns tipos de luz não conseguem produzir o efeito fotoelétrico?



Novas Descobertas Experimentais



O espectro da luz do Sol, quando analisado com um espectrógrafo, mostra linhas escuras (linhas de Fraunhofer).

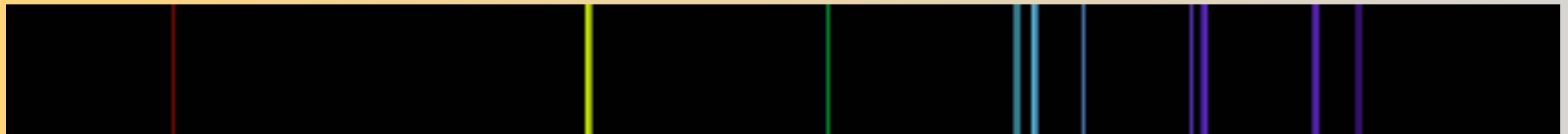
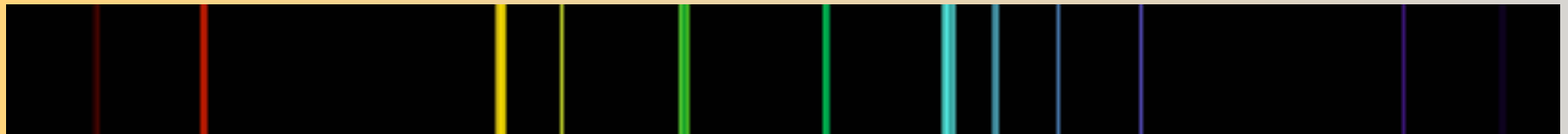


Novas Descobertas Experimentais

Descobriu-se que cada elemento químico emitia (ou absorvia) luz com um espectro descontínuo de raias.

A espectroscopia se tornou um importante método de identificação de elementos.

Mas qual era a causa dessas raias?



Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Radiação de Corpo Negro

O que é um corpo negro? É um objeto capaz de absorver toda a radiação nele incidente.

É um objeto capaz de emitir, em cada parte do espectro eletromagnético, a máxima energia devido à sua temperatura apenas.

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Radiação de Corpo Negro

O que é radiação térmica?

É a radiação emitida por qualquer corpo, devido à sua temperatura.

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

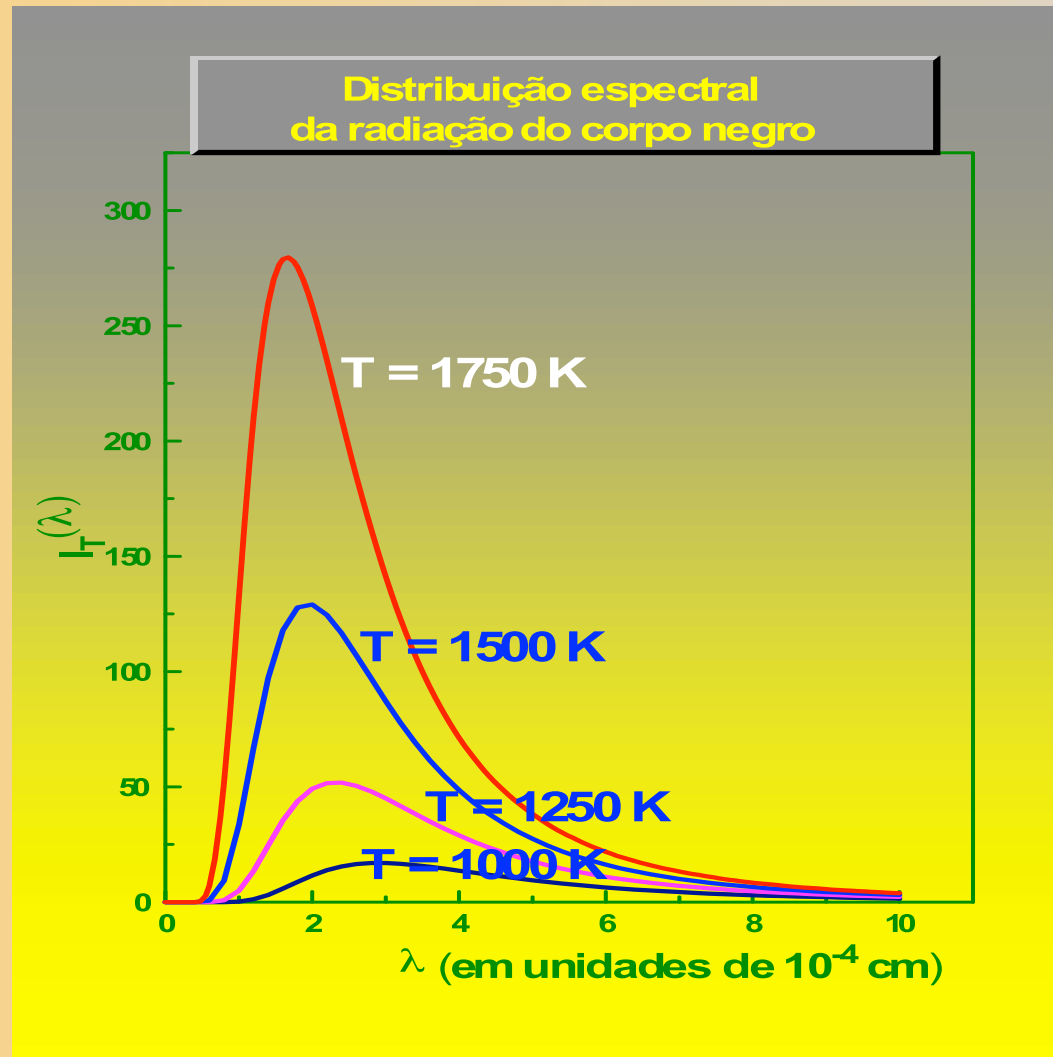
Radiação de Corpo Negro

Uma aproximação experimental de corpo negro foi sugerida por Kirchhoff:

um pequeno orifício em uma cavidade aquecida à uma temperatura uniforme.

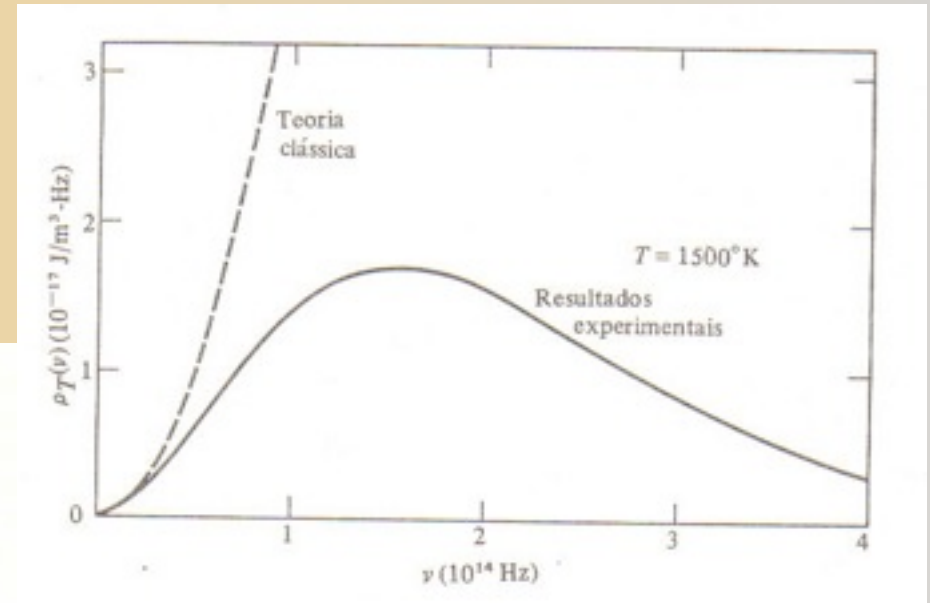
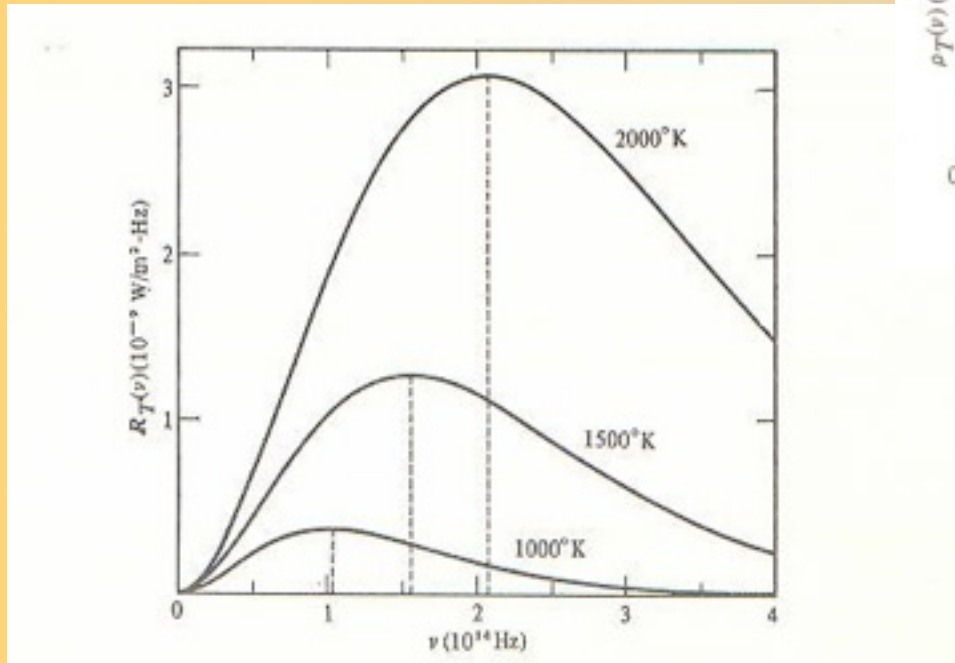
Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Radiação de Corpo Negro



Os Problemas da Física no Final do Século XIX

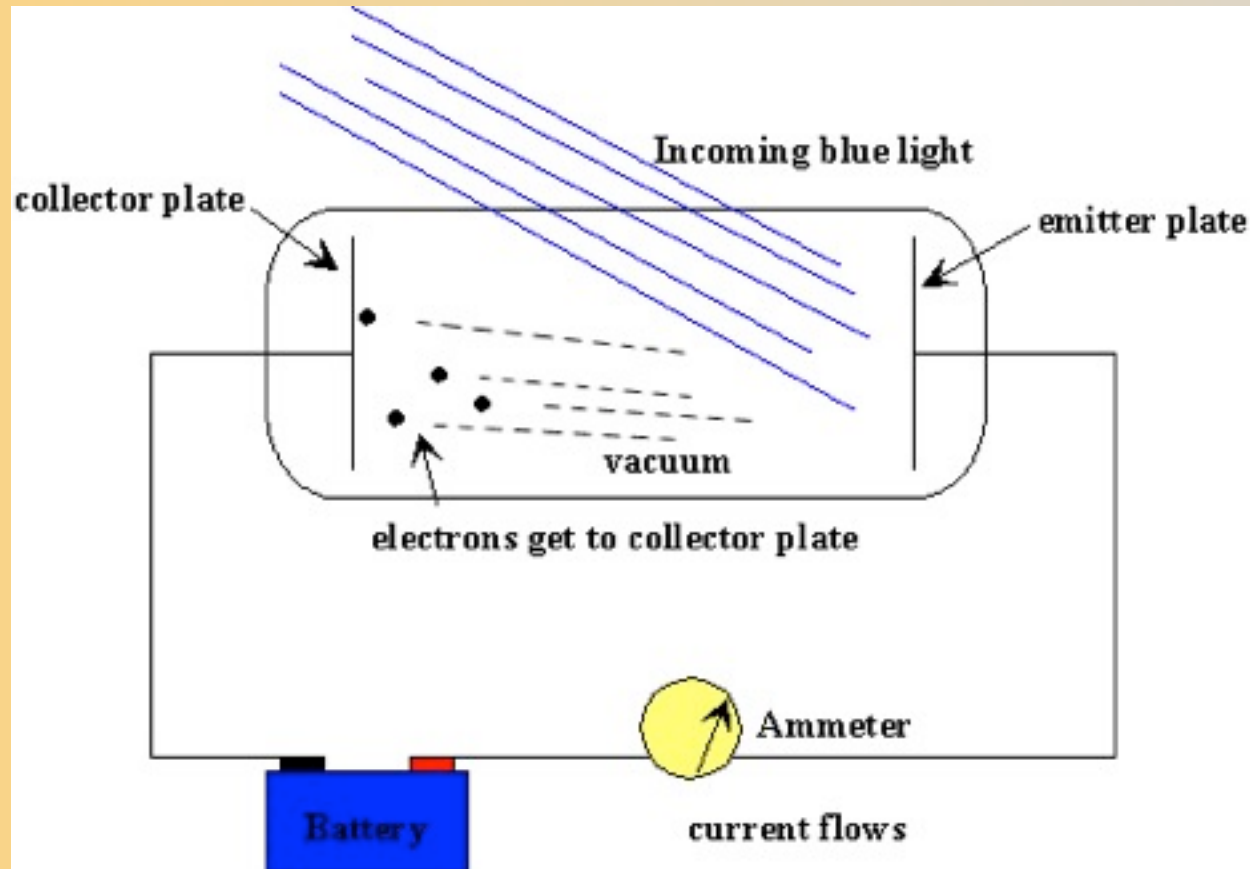
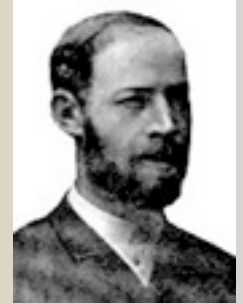
Radiação de Corpo Negro



Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Fotoelétrico

Heinrich Hertz (1887)



Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Fotoelétrico



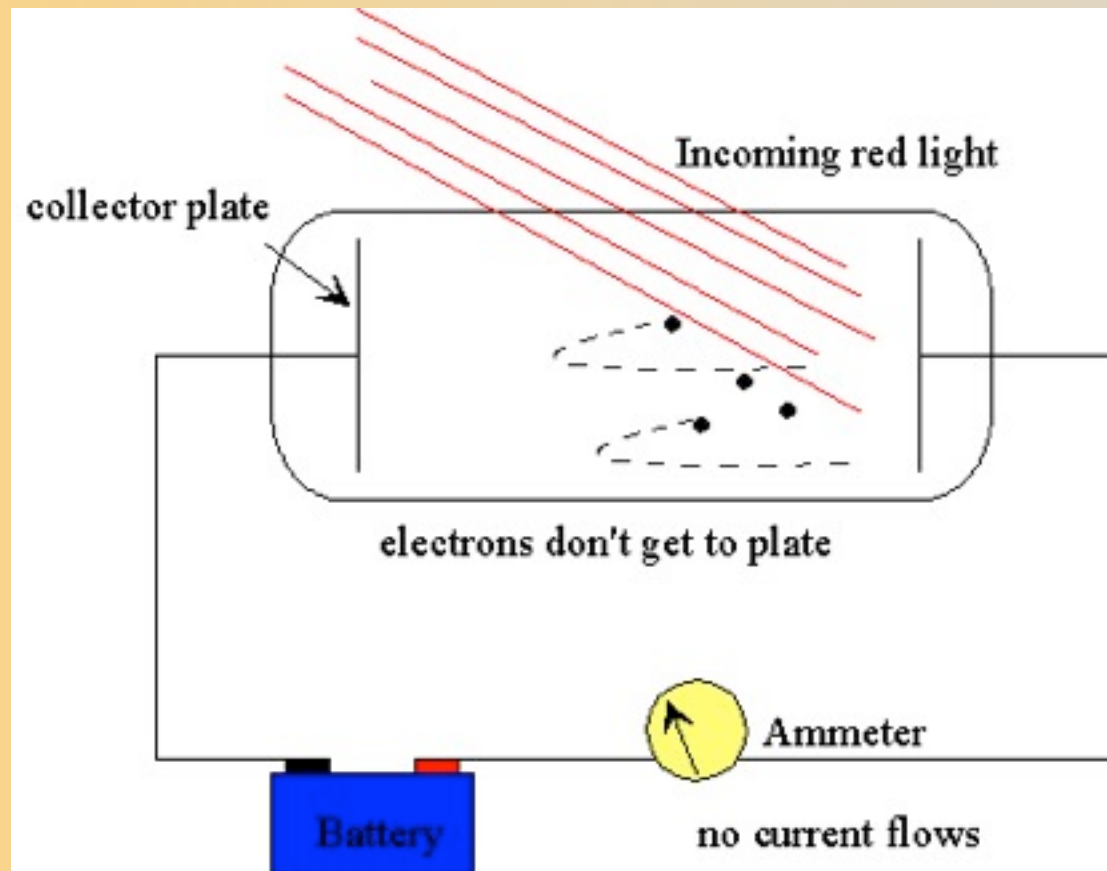
Philipp Lenard:

- Quando uma radiação de frequência maior ou igual a 10^{15} Hz incide sobre uma superfície metálica, ocorre emissão de elétrons.
- A emissão ocorre a alto vácuo, portanto os portadores de carga não são íons gasosos.
- A ação de um campo magnético confirma a carga negativa dos portadores
- a razão e/m fornecia a carga do elétron obtida por Millikan e Thomsom

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Fotoelétrico

Heinrich Hertz (1887)



Os Problemas da Física no Final do Século XIX

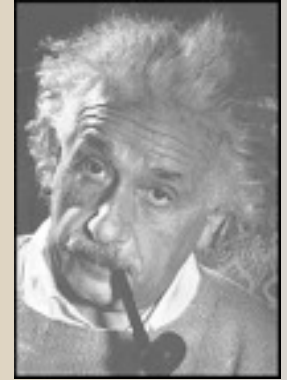
Efeito Fotoelétrico – Problemas com a Física Clássica

- 1) O aumento da intensidade da radiação incidente deveria resultar no aumento do potencial limite
- 2) O efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência, dependendo apenas da intensidade da radiação incidente
- 3) Deveria existir um intervalo de tempo mensurável entre a absorção da energia da radiação e a emissão do elétron.

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Fotoelétrico

Albert Einstein (1905)



Assumiui:

- luz monocromática consistia de um fluxo de partículas (fótons) com energia

$$E = h\nu$$

- Na interação do fóton com o elétron podia ocorrer:
 - espalhamento do fóton segundo as leis da óptica
 - absorção completa da energia do fóton pelo elétron, com o desaparecimento do fóton e emissão do elétron (fotoelétron)

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Fotoelétrico

Albert Einstein (1905)

$$K = h \nu - w$$

The diagram illustrates the photoelectric effect equation $K = h \nu - w$. Three orange arrows point from descriptive text to the variables in the equation: K , $h \nu$, and w .

- An arrow points from the text "Energia cinética do fotoelétron" to the variable K .
- An arrow points from the text "Energia do Fóton incidente" to the term $h \nu$.
- An arrow points from the text "Trabalho para remover o elétron do metal" to the variable w .

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Fotoelétrico

Albert Einstein (1905)

Solução do problema:

- Ausência de retardamento no processo

Fóton (energia concentrada) é absorvido integralmente \Rightarrow emissão instantânea

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

1916 – Einstein propõe que um fóton possui momento dado por

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

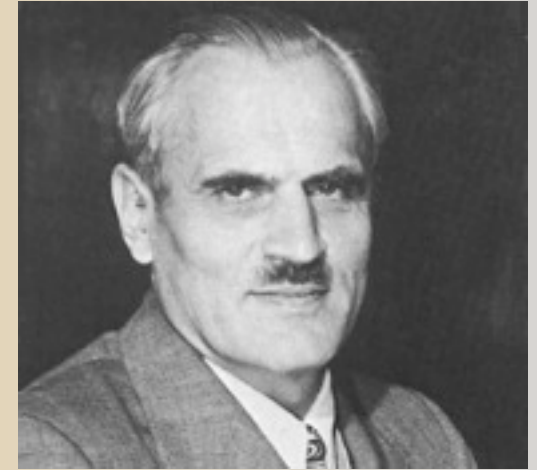
Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Compton

1923 – Arthur Holly Compton

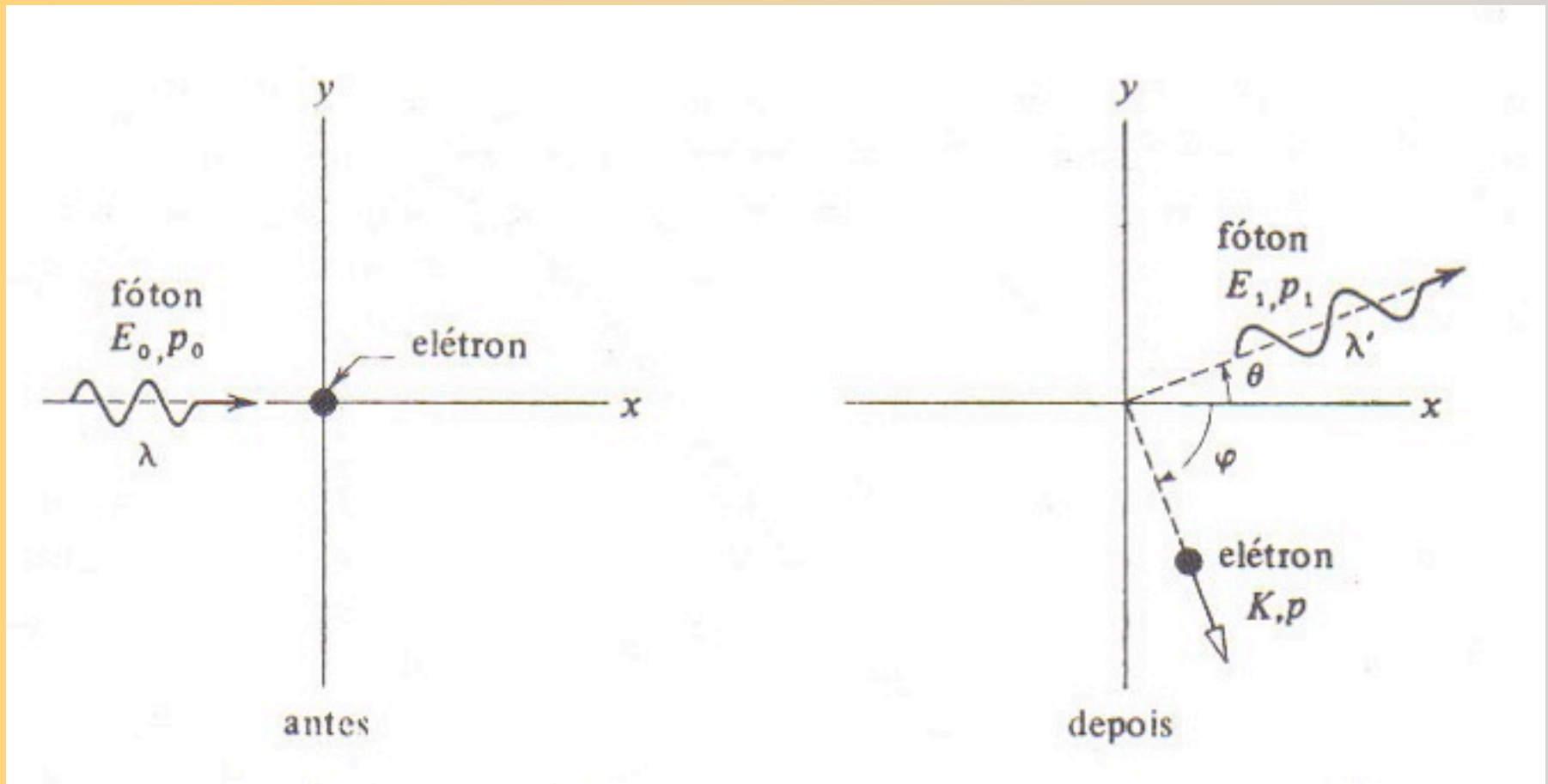
Incidu raios-X sobre um alvo de grafite

Mediu a intensidade do raio-X espalhado em função do comprimento de onda.



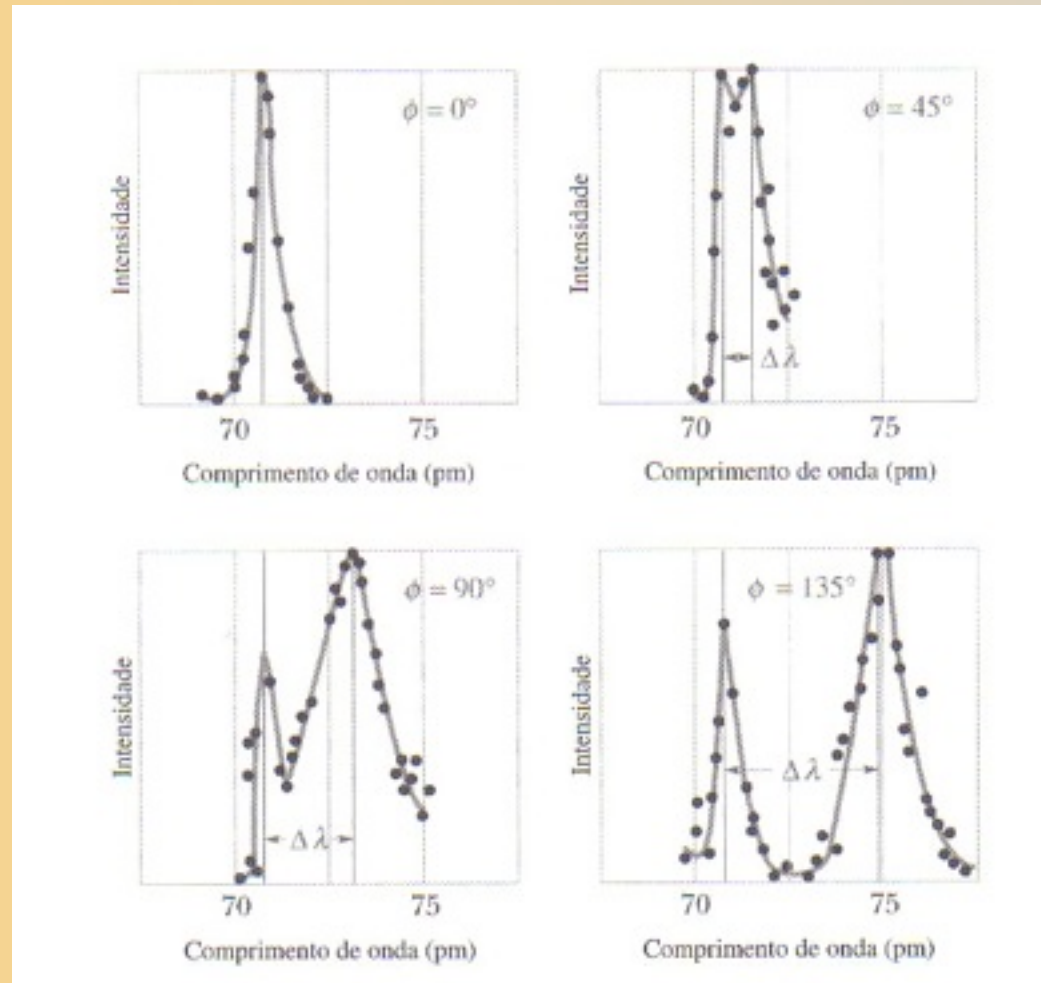
Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Compton – Ilustração do efeito



Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Compton – Resultados experimentais



Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Compton – Explicação

- 1) Conservação da energia total relativística

$$E_0 + m_0c^2 = E_s + m_0c^2 + K$$

- 2) Conservação do momento linear

$$\begin{cases} p_0 = p_1 \cos \theta + p \cos \phi \\ p_1 \sin \theta = p \sin \phi \end{cases}$$

Os Problemas da Física no Final do Século XIX

Efeito Compton – Explicação

$$\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_0} = \frac{1}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

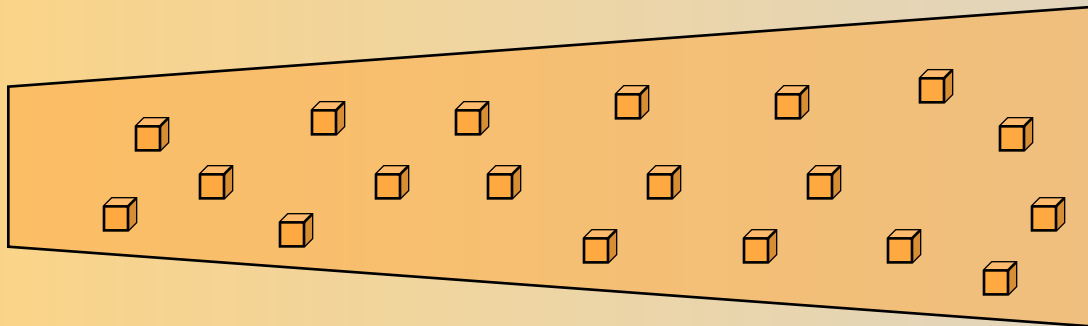
$$\frac{h}{p_1} - \frac{h}{p_0} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

Deslocamento
Compton

$$\underbrace{\lambda - \lambda_0}_{\Delta \lambda} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

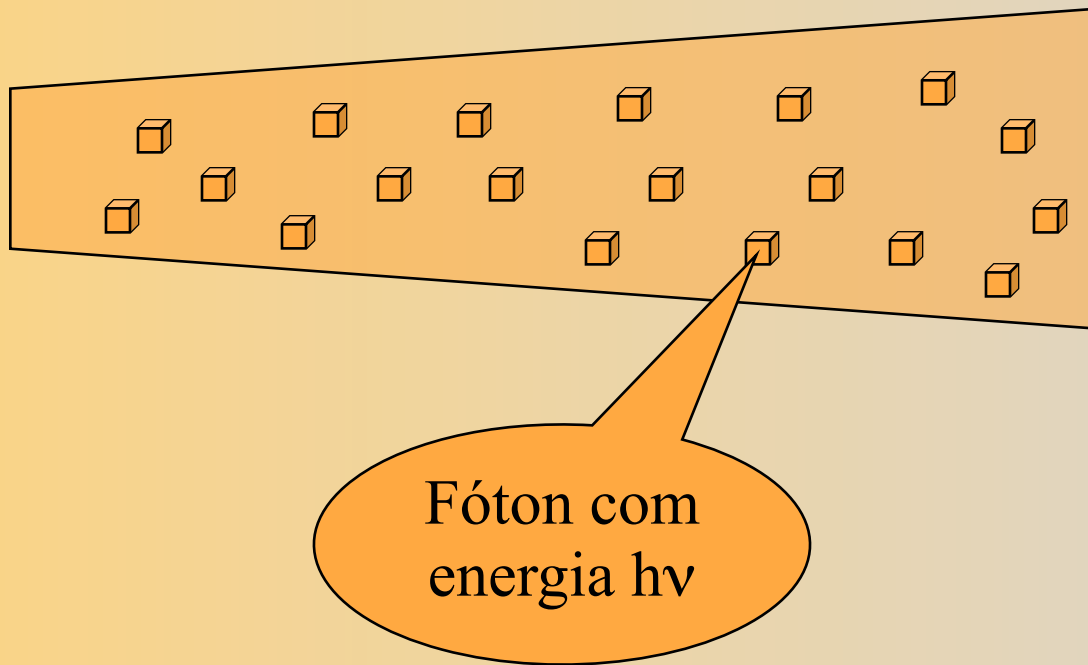
Natureza da Luz

Luz monocromática



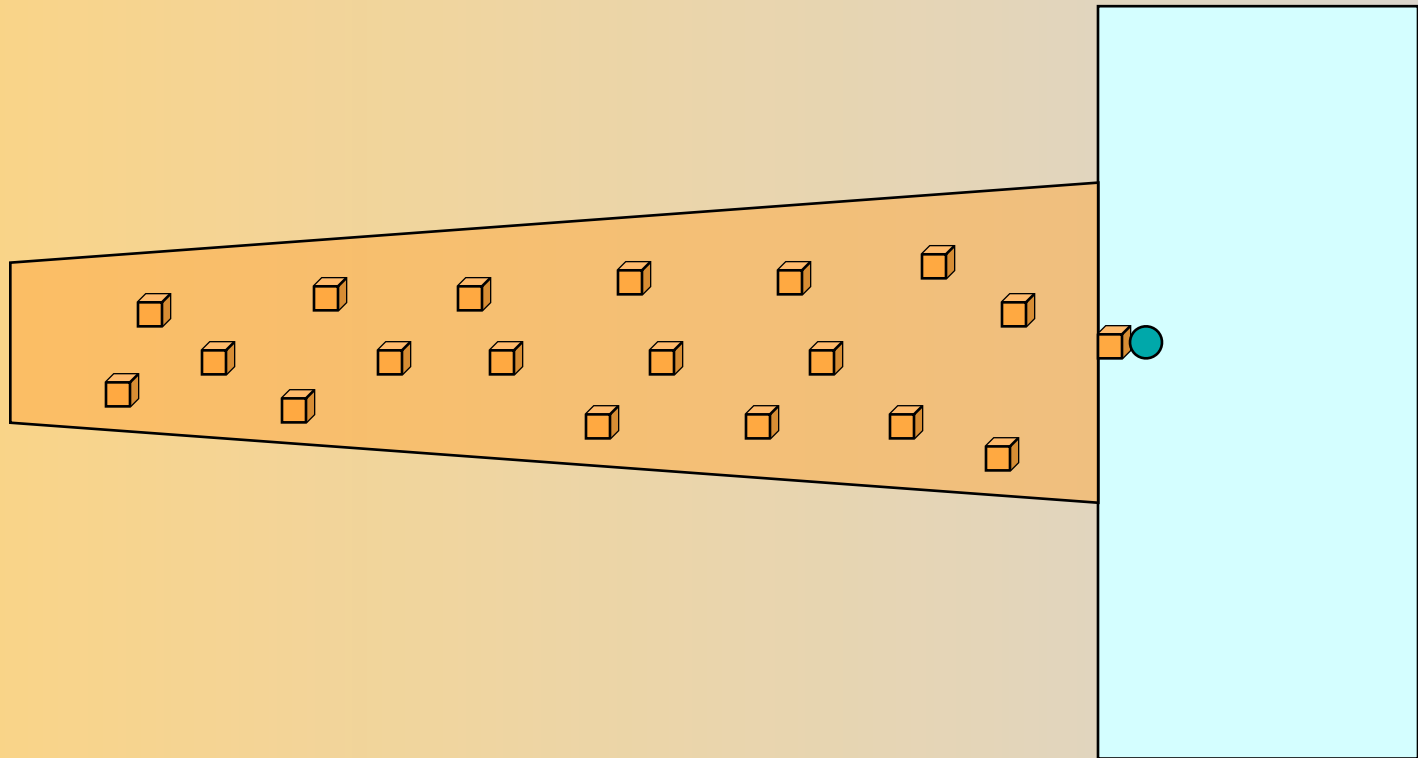
Natureza da Luz

Luz monocromática



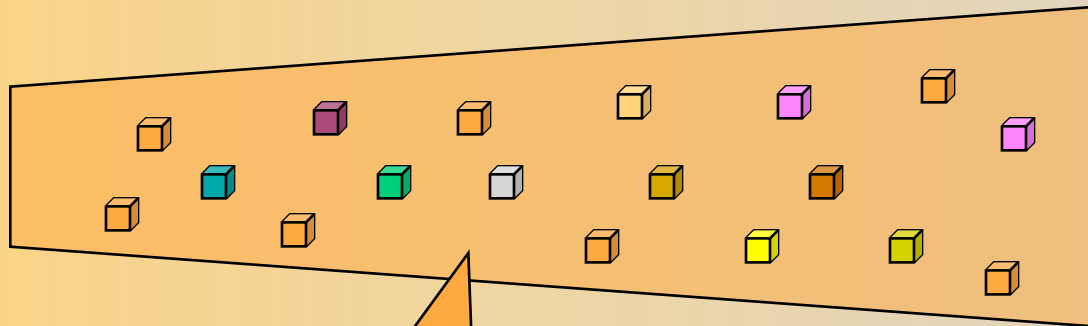
Natureza da Luz

Interação luz monocromática - matéria



Natureza da Luz

Luz policromática



Cada fóton com
sua energia $h\nu$

Natureza Dual da Matéria

Experimento de Young: natureza ondulatória da luz

Efeito Compton: natureza corpuscular da radiação

1924 - Louis Victor de Broglie: da simetria da natureza, as partículas devem exibir um comportamento ondulatório, com comprimento de onda dado por

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Natureza Dual da Matéria

**Tese de de Broglie confirmada por G. P. Thomson, J. Davisson
E L. G. Germer (elétrons podiam ser difratados!)**

$$E = h\nu$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Relações de de Broglie-Einstein

Princípio da Incerteza de Heisenberg

1927 – Werner Heisenberg

Estabelece um limite para medidas simultâneas de certos pares de variáveis.

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2}$$



Princípio da Incerteza de Heisenberg

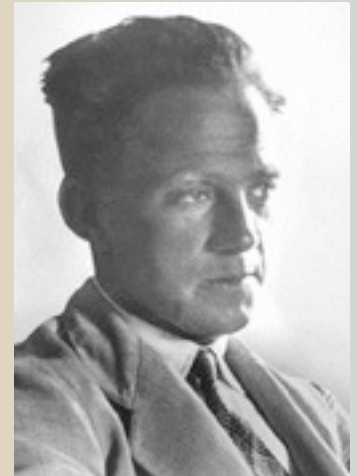
1927 – Werner Heisenberg

Estabelece um limite para medidas simultâneas de certos pares de variáveis.

Incerteza na
medida do
momento

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2}$$



Princípio da Incerteza de Heisenberg

1927 – Werner Heisenberg

Estabelece um limite para medidas simultâneas de certos pares de variáveis.

Incerteza na
medida da posição

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2}$$



Princípio da Incerteza de Heisenberg

1927 – Werner Heisenberg

Estabelece um limite para medidas simultâneas de certos pares de variáveis.

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2}$$

Incerteza na
medida da
energia



Princípio da Incerteza de Heisenberg

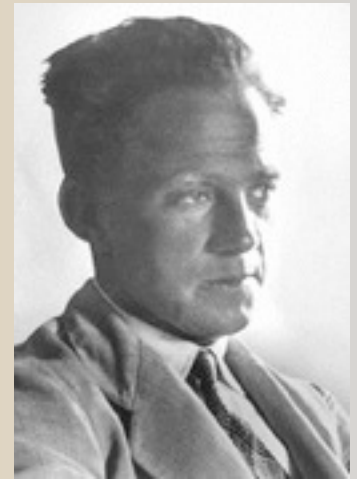
1927 – Werner Heisenberg

Estabelece um limite para medidas simultâneas de certos pares de variáveis.

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2}$$

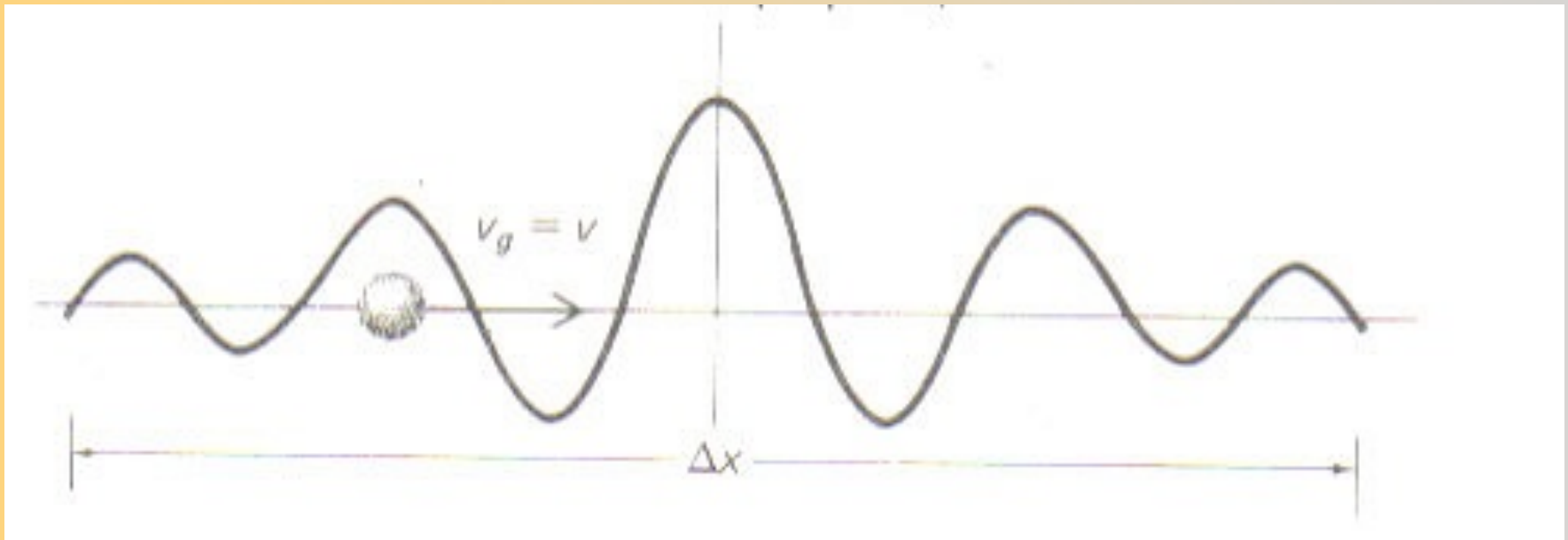
Incerteza na
medida do
intervalo de tempo



Princípio da Incerteza de Heisenberg

Porque esse fenômeno não é percebido nos eventos cotidianos?

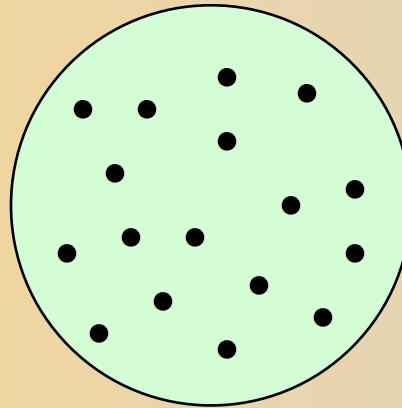
Representação de uma Onda de Matéria



Modelos Atômicos

Modelo de Thomson

“Pudim de ameixas”

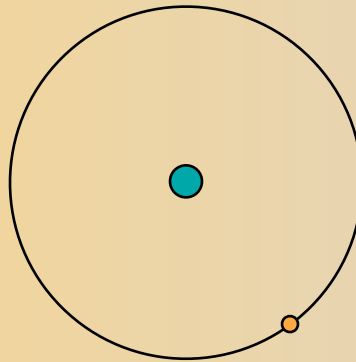


Problemas: não explicava os espectros de emissão observados experimentalmente e sucumbiu ao estudo do espalhamento de partículas α realizado por Rutherford.

Modelos Atômicos

Modelo de Rutherford

Modelo nucleado

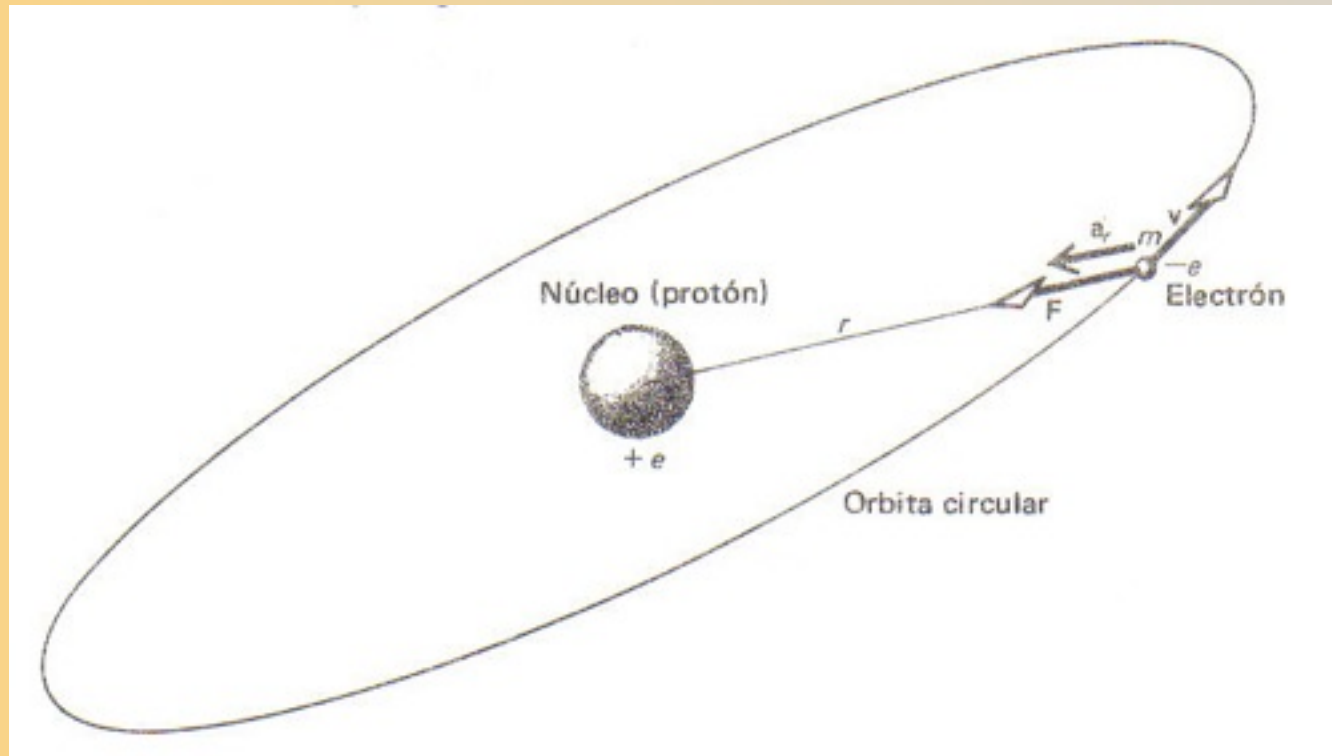


Problema: não explicava a estabilidade do átomo nuclear

Modelos Atómicos

Modelo de Bohr

Modelo de Rutherford + 4 postulados



Modelos Atômicos

Postulados de Bohr:

- 1) Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência da atração eletrostática entre o elétron e o núcleo.
- 2) Um elétron só pode se mover em uma órbita tal que $L = nh$
- 3) Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron em uma dessas órbitas não emite radiação eletromagnética e, portanto, sua energia permanece constante.
- 4) Ao mudar de uma órbita de energia E_i para uma outra de energia E_f ($E_f < E_i$) o elétron emite uma radiação de frequência $\nu = (E_f - E_i)/h$

Modelos Atômicos

Frequência da radiação emitida em uma transição eletrônica no átomo de H:

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$$

$$\nu = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{4\pi h^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Reproduz as séries espectrais de Lyman ($n_f=1$), Balmer ($n_f=2$), Paschen ($n_f=3$), Brackett ($n_f=4$) e Pfund ($n_f=5$)

Crítica à Antiga Mecânica Quântica

- Mantém muitos aspectos da Física Clássica, como o determinismo das órbitas do átomo de hidrogênio.
- É aplicável apenas a átomos de um elétron. Para os elementos alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs) ela torna-se uma aproximação razoável, mas falha clamorosamente para átomos com mais de um elétron.
- Subjetivamente, a teoria parece não ter coerência.